

1	Einleitung	11
1.1	Hintergrund	11
1.2	Zielsetzung und Zielpublikum	13
1.3	Inhaltlicher Aufbau	14
2	Zusammensetzung und Herstellung von Asphalt	17
2.1	Definition von Asphalt	17
2.2	Bitumen	17
2.2.1	Überblick	17
2.2.1.1	Definition von Bitumen	17
2.2.1.2	Viskoser, thermoplastischer Werkstoff	18
2.2.1.3	Verwendung	20
2.2.2	Bitumenchemie (Grundlagen)	22
2.2.2.1	Erdölderivat	22
2.2.2.2	Kohlenwasserstoff-Verbindung	23
2.2.2.3	Bitumenanteile nach Polarität	24
2.2.2.4	Mizellenmodell für das Bitumenkolloid	27
2.2.3	Herstellung und Aufbereitung von Straßenbaubitumen	30
2.2.3.1	Natürliches Bitumen (Naturbitumen)	30
2.2.3.2	Bitumenproduktion in der Raffinerie	30
2.2.3.3	Kennzeichnung mittels API-Grads und Schwefelgehalts	32
2.2.3.4	Aufbereitung zu Bitumenemulsion, Flux- und Kaltbitumen	34
	(A) Polymermodifiziertes Bitumen (PmB)	34
	(B) Viskositätsverändertes Bitumen	34
	(C) Bitumenemulsion	35
	(D) Fluxbitumen und Kaltbitumen	37
2.2.4	Bio-Bitumen	38
2.2.4.1	Hintergrund	38
2.2.4.2	Bitumenersatzstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen	40
	(A) Lignin	41
	(B) Pflanzliches Harz	42
	(C) Tallpech	42

2.2.5	Zusätze zur Bitumenmodifikation (Auswahl)	43
2.2.5.1	Polymere	43
2.2.5.2	Viskositätsverändernde Mittel	45
2.2.5.3	Regenerationsmittel (Verjüngung)	45
2.2.5.4	Bindemittelträger	45
2.2.5.5	Kalkhydrat	46
2.2.5.6	Haftverbesserer	48
2.2.5.7	Polyurethan	48
2.2.5.8	Gummipartikel	49
2.2.5.9	Nanoobjekte	51
2.2.5.10	Farbpigmente	52
2.2.5.11	Fasern zur ‚Bewehrung‘	52
2.3	Gestein	53
2.3.1	Gesteinsarten und typische Straßenbaugesteine	55
2.3.1.1	Natürliche Gesteine	55
(A)	Magmatische Gesteine	56
(B)	Sedimentgesteine	61
(C)	Metamorphe Gesteine	64
2.3.1.2	Gesteinsvorkommen im Harz	65
2.3.1.3	Industriell hergestellte (künstliche) Gesteine	68
2.3.1.4	Rezyklierte Gesteinskörnungen	70
2.3.1.5	Hinweise zur Gesteinserkennung	71
2.3.2	Gesteinseigenschaften (Auswahl) und ihre Bestimmung	74
2.3.2.1	Aufbereitung	75
2.3.2.2	Anforderungen	76
2.3.2.3	Korngrößenverteilung	77
2.3.2.4	Gehalt an Feinanteilen	80
2.3.2.5	Kornform von groben Gesteinskörnungen	81
2.3.2.6	Bruchflächigkeit grober Gesteinskörnungen	83
2.3.2.7	Zertrümmerung von groben Gesteinskörnungen	85
2.3.2.8	Frostbeanspruchung (Frostbeständigkeit)	87
2.3.2.9	Polieren von groben Gesteinskörnungen	89
2.3.2.10	Fließkoeffizient (innere Reibung von Sanden)	91
2.3.2.11	SiO ₂ -Gehalt	92

2.4	Wiederverwendbarer Ausbauasphalt	94
2.4.1	Wiederverwendbarer in der Asphaltmischanlage	96
2.4.2	Rejuvenator (Regenerationsmittel).	99
2.4.3	Mehrfache Wiederverwendung von Asphalt.	103
2.5	Asphaltarten und -sorten	105
2.5.1	Grundlagen zum Straßenaufbau	105
2.5.2	Begriffsdefinitionen zu Asphaltarten und -sorten	108
2.5.3	Grundlagen der Mischgutzusammensetzung.	110
2.5.3.1	Einflussgrößen beim Mix Design.	111
	(A) Korngrößenverteilung (Sieblinie).	111
	(B) Bindemittel	112
2.5.3.2	Vorgehen beim Mix Design	115
2.5.3.3	Erstprüfung (Typprüfung).	117
2.5.4	Asphaltarten: Walzasphalt und Gussasphalt	119
2.5.5	Bauprinzipien von Asphalt	122
	(A) Mastixkonzept	123
	(B) Packungskonzept	124
	(C) Stützgerüstkonzept	127
	(D) Offenes Stützgerüstkonzept	128
	(E) Vergleich der Bauprinzipien.	131
2.5.6	Warmasphalt	133
2.5.6.1	Viskositätsverändernde Mittel	136
2.5.6.2	Schaumasphalt	136
2.6	Asphaltproduktion.	137
3	Gebrauchsverhalten von Asphalt	141
3.1	Zum Begriff ‚Gebrauchsverhalten‘	141
3.2	Äußere und innere Einwirkungen auf die Straße	142
3.2.1	Äußere mechanische Einwirkung.	143
3.2.1.1	Achslasten des Schwerverkehrs	143
3.2.1.2	Drehender Beanspruchungszustand	146
3.2.1.3	Temperatur-Geschwindigkeits-Abhängigkeit.	149
3.2.2	Äußere Einwirkung aus dem Temperaturgang	151
3.2.2.1	Lufttemperatur	151

3.2.2.2	Straßenoberflächentemperatur	151
3.2.2.3	Temperaturprofil im Straßenkörper	154
3.2.3	Innere Einwirkung aus der Vorspannung des Korngerüsts	154
3.3	Strukturelle Schädigung	155
3.3.1	Rissbildung	155
3.3.1.1	Zur Entstehung von Mikro- und Makrorissen	155
3.3.1.2	Abkühlungsbedingte (kryogene) Rissbildung	157
3.3.2	Bleibende Verformung	159
3.3.3	Materialermüdung	160
3.3.3.1	Phänomen	160
3.3.3.2	Schichtenverbund	161
3.4	Alterung und Einwirkung von Wasser	164
3.4.1	Bindemittelalterung	164
(A)	Oxidative Bindemittelalterung	166
(B)	Destillative Bindemittelalterung	168
(C)	Strukturalterung	169
3.4.2	Haftverhalten unter Einwirkung von Wasser	170
3.5	Auto-Regeneration (Selbstheilung)	173
4	Modellierung von rheologischen Eigenschaften	175
4.1	Grundbegriffe der Mechanik	175
4.1.1	Materialmodellierung	175
4.1.2	Spannung, Dehnung	176
4.1.2.1	Belastung und Beanspruchung	177
4.1.2.2	Spannung, Spannungstensor	177
4.1.2.3	Verzerrung und Dehnung	180
4.1.3	Homogener und inhomogener Spannungszustand	182
4.1.4	Isotropes Materialverhalten	185
4.1.5	Verformungsverhalten: Elastizität, Plastizität, Viskosität	185
4.1.5.1	Elastisches Verformungsverhalten	186
4.1.5.2	Plastisches Verformungsverhalten	188
4.1.5.3	Viskoses Verformungsverhalten	189
4.1.6	Steifigkeit und Festigkeit	191
4.1.6.1	Steifigkeit	191
4.1.6.2	Festigkeit	192

4.2	Beanspruchungsbereiche von Bitumen und Asphalt	192
4.2.1	Linear-viskoelastischer (LVE) Bereich	192
4.2.2	Nichtlineares Materialverhalten außerhalb des LVE Bereichs	194
4.3	Materialverhalten im LVE Bereich	198
4.3.1	Superpositionsprinzip nach Boltzmann	198
4.3.2	Kriechen (LVE Verhalten im Zeitbereich)	200
4.3.3	Relaxation (LVE Verhalten im Zeitbereich)	201
4.3.4	Komplexer Modul (LVE Verhalten im Frequenzbereich)	203
4.3.4.1	Komplexer E-Modul E^*	203
4.3.4.2	Komplexer Schermodul G^*	209
4.3.4.3	Komplexe Poissonsche Zahl ν^*	210
4.3.4.4	Cole-Cole Diagramm und Black Diagramm	211
4.3.5	Temperatur-Frequenz-Äquivalenz und Masterfunktion	212
4.3.6	Energiedissipation bei zyklischer Beanspruchung	215
4.3.7	Rheologische Modelle (Auswahl)	217
4.3.7.1	Maxwell, Kelvin-Voigt Modell	218
4.3.7.2	Burgers Modell	219
4.3.7.3	Verallgemeinertes Maxwell und Kelvin-Voigt Modell	219
4.3.7.4	Power Law, Huet und Huet-Sayegh Modell	220
4.3.7.5	2S2P1D Modell	221
4.3.8	Korrelation von Bitumen- und Asphaltverhalten	223
5	Laborkennwerte des Asphaltverhaltens	227
5.1	Überblick	227
5.1.1	Gebrauchsverhaltensorientierte Prüfung	227
5.1.1.1	Bindemittelprüfung	227
5.1.1.2	Mastixprüfung	230
5.1.1.3	Asphaltprüfung	232
5.1.2	Statische und zyklische Beanspruchung	236
5.1.3	Skaleneffekte (Mehrskalenmodell)	237
5.2	Bindemittelkennwerte	240
5.2.1	Bindemittelialterung	240
5.2.1.1	Rolling Thin Film Oven Test	241
5.2.1.2	Pressure Ageing Vessel	242

5.2.2	Konventionelle Bindemittelkennwerte	242
5.2.2.1	Nadelpenetration zur Sortenbezeichnung	242
5.2.2.2	Erweichungspunkt Ring und Kugel	244
5.2.2.3	Brechpunkt nach Fraaß	247
5.2.2.4	Gebrauchstemperaturspanne (Plasizitätsspanne)	248
5.2.2.5	Duktilität, Kraftduktilität, elastische Rückstellung	249
5.2.3	Rheologische Bindemittelkennwerte im LVE Bereich	251
5.2.3.1	Das Dynamische Scherrheometer	251
5.2.3.2	Viskoelastisches Materialverhalten	256
	(A) Bestimmung des LVE Bereichs	256
	(B) Komplexer Schermodul und Phasenwinkel (T-f-Sweep)	256
5.2.4	Bindemittelklassifikation	259
5.2.4.1	Klassifikation gemäß Europäischer Norm	259
5.2.4.2	Performance Grade System	260
5.2.4.3	Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahren und T-Sweep	262
	(A) Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahren (BTSV)	262
	(B) Temperatur-Sweep Test (T-Sweep Test)	267
5.2.4.4	Bestimmung der Phasenübergangstemperatur	268
5.2.5	Kennwerte des Gebrauchsverhaltens von Bindemitteln	269
5.2.5.1	Verformungswiderstand	270
	(A) Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCRT)	270
	(B) Single Shear Creep Test (SSCT)	274
5.2.5.2	Ermüdungswiderstand	275
	(A) Stress Amplitude Fatigue Test (SAFT)	275
	(B) Forschungsbedarf zum Ermüdungsverhalten	275
5.2.5.3	Widerstand gegen Kälterissbildung	276
	(A) Relaxationsprüfung mit 4 mm Plattendurchmesser	276
	(B) Biegekriechverhalten im Biegebalkenrheometer (BBR)	277
5.2.5.4	Dynamische Viskosität im Rotationsviskosimeter	280
5.2.5.5	Haftverhalten Bindemittel-Gestein	281
5.2.5.6	Bestimmung des Alterungszustands	282
5.2.5.7	Beurteilung der Wirksamkeit eines Regenerationsmittels	284
5.2.6	Analyse der elementaren Bindemittelzusammensetzung	290
5.2.6.1	Chromatografische Verfahren	290
5.2.6.2	Spektroskopische Verfahren	292
5.2.6.3	Mechanische Abtastverfahren der Oberflächenchemie	293

5.3	Mastixkennwerte.	295
5.3.1	Mastixproben	295
5.3.2	Viskoelastisches Materialverhalten (T-f-Sweep).	296
5.3.3	Kennwerte des Gebrauchsverhaltens von Mastix	297
5.3.3.1	Widerstand gegen Verformung, Ermüdung und Kälterisse	297
5.3.3.2	Mastixviskosität im ko-axialen Zylinder	299
5.3.3.3	DSR-Prüfung mittels Festkörpereinspannung	300
5.4	Asphaltekennwerte.	301
5.4.1	Herstellung von Asphaltprobekörpern	301
5.4.2	Volumetrische Kennwerte.	304
5.4.2.1	Rohdichte	305
5.4.2.2	Raumdichte	306
5.4.2.3	Hohlraumgehalt	307
5.4.2.4	Verdichtungsgrad.	308
5.4.3	Kennwerte des Gebrauchsverhaltens aus statischen Asphaltprüfungen	309
5.4.3.1	Widerstand gegen Kälterissbildung (Abkühlversuch)	309
5.4.3.2	Einaxialer Zugversuch	310
5.4.3.3	Abscherversuch.	312
5.4.4	Kennwerte des Gebrauchsverhaltens aus zyklischen Asphaltprüfungen	313
5.4.4.1	Verformungswiderstand.	314
(A)	Prüfmethodik	314
(B)	Prüfverfahren.	316
5.4.4.2	Steifigkeit (Modul E^*) im LVE Bereich	322
(A)	Einflussgrößen.	322
(B)	Prüfverfahren.	324
5.4.4.3	Ermüdungswiderstand.	324
(A)	Prüfmethodik	324
(B)	Ermüdungskriterien	327
(C)	Wöhlerkurve	329
(D)	Einflussgrößen.	331
(E)	Prüfverfahren (Auswahl)	334
5.4.4.4	Auto-Regeneration	340
5.4.4.5	Rechnerische Lebensdauer.	343
(A)	Überblick	343

(B) Mehrschichtentheorie	346
(C) Miner Regel	347
5.4.4.6 Schermodul und Lastwechselzahl bei Scherermüdung.	348
5.4.5 Kennwerte aus der dynamischen Prüfung	349
6 Ökobilanzierung von Asphaltbefestigungen	353
6.1 Begriffe ‚Ökobilanzierung‘ und ‚Lebenszyklus‘	353
6.1.1 Ökobilanzierung	353
6.1.2 Lebenszyklus von Straßen	356
6.2 Sach- und Wirkungsbilanz als Teile der Ökobilanzierung	359
6.2.1 Sachbilanz	359
6.2.2 Wirkungsbilanz	359
6.3 Software-Entwicklungen	362
6.3.1 Überblick.	362
6.3.2 Berechnungstool aus dem Projekt ÖKOPOST	364
6.3.3 LCA-Software aus dem Projekt SABINA	365
Literaturhinweise	367
Deutschsprachige Fachbücher zu Bitumen und Asphalt	367
Fachzeitschriften und Heftreihen	368
Datenbanken.	369
Abbildungsverzeichnis	371
Stichwortverzeichnis	377
Danksagung	387